

HASIL PEMBAKARAN EMISI RENDAH DENGAN MENGGUNAKAN BAHAN
API BIODIESEL BERBANTUKAN ALIRAN BERPUSAR

MOHAMAD SHAIFUL ASHRUL BIN ISHAK

Tesis ini dikemukakan sebagai memenuhi
syarat penganugerahan ijazah
Doktor Falsafah (Kejuruteraan Mekanikal)

Fakulti Kejuruteraan Mekanikal
Universiti Teknologi Malaysia

JUN 2015

Buat bonda & ayahanda...

Terima kasih di atas sokonganmu selama ini...

Buat Sahabat semua...

Terima kasih kerana menemani ku di saat suka dan duka...

PENGHARGAAN

Syukur alhamdulillah, dengan izinNya maka dapatlah tesis ini disudahkan dengan jayanya. Semoga hasil penyelidikan ini membawa kebaikan dan memberi pengetahuan kepada semua, sama ada secara langsung ataupun tidak.

Saya ingin merakamkan penghargaan yang tidak terhingga kepada semua pihak yang terlibat dalam usaha menyiapkan projek ini terutama buat penyelia projek, Profesor Dr. Mohammad Nazri bin Mohd Jaafar dan Profesor Madya Dr. Mazlan bin Abdul Wahid yang telah banyak memberikan nasihat serta tunjuk ajar dalam menjalankan penyelidikan. Jutaan terima kasih kepada rakan-rakan seperjuangan dan juruteknik Makmal Pembakaran, Fakulti Kejuruteraan Mekanikal kerana telah begitu banyak membantu melicinkan perjalanan projek ini baik dari segi luahan kudrat mahu pun pendapat.

Duhai insan;
budimu abadi...

Wassalam.

Jun, 2015

ABSTRAK

Pembakaran merupakan kaedah penghasilan tenaga utama dunia. Walau bagaimana pun pembakaran semburan bahan api biodiesel menghadapi masalah kerana pengabusan yang kurang baik. Oleh itu pengurangan pelepasan emisi dalam pembakaran merupakan satu bidang kajian yang sangat penting. Sebuah pembakar untuk bahan api biodiesel yang menggunakan pemusar udara bilah lengkung aliran jejarian dengan suntikan bahan api tunggal telah dikaji secara ujikaji dan analisis penyelakuan. Percampuran bahan api dengan udara yang pantas dan pembentukan zon edaran semula dalaman oleh aliran pusaran yang kuat menghasilkan nyalaan yang stabil dan emisi NO_x yang rendah. Penilaian model aliran dan pembakaran telah dijalankan untuk mengkaji pembakar beraliran pusar ini menggunakan dinamik bendalir berkomputer (CFD). Hasil analisis daripada gabungan penggunaan model gelora *realizable k- ϵ* dan model pembakaran *Eddy Dissipation*, didapati gas emisi diedarkan semula ke dalam pusat teras zon gelang edaran semula ke dalam zon pembakaran utama. Susuk pembakaran juga menunjukkan pusaran kuat menghasilkan nyalaan yang pendek dan stabil pada jarak z/D kurang daripada 40%. Daripada hasil ujikaji pula didapati pembentukan emisi NO_x berkurang sebanyak 20% dengan penggunaan aliran pusaran tinggi jika dibandingkan dengan pusaran rendah yang tiada zon edaran semula. Selain itu pembentukan emisi lain seperti karbon monoksida (CO) dan hidro karbon tak terbakar (HC) adalah rendah di rantau teras pusat untuk semua pusaran tinggi. Sementara itu dengan kaedah pra-pemanasan udara masukan, pembentukan emisi CO dan HC dapat dikurangkan sebanyak 23% jika dibandingkan dengan kaedah tanpa pra-pemanasan. Ukuran emisi juga menunjukkan lebih oksigen yang lebih rendah dengan pembakaran pusaran tinggi berbanding dengan pembakaran pusaran yang rendah. Ini membuktikan pembakaran adalah lebih cekap dengan pembakaran pusaran tinggi. Hasil kajian ini boleh digunakan untuk reka bentuk pembakar generasi baru yang lebih mapan dan mesra alam.

ABSTRACT

Combustion is a major global energy production method. However combustion of biodiesel fuel spray having problems because of poor atomization. Therefore emission reduction in this combustion system is a very important field of study. A combustor for biodiesel fuel which uses curved blade radial flow swirler with single fuel injection was studied by experiment and simulation analysis. The quick fuel-air mixing and the creation of an internal re-circulation zone due to strong the swirl produced stable flame and low NO_x emission. Analysis of flow and combustion model was conducted to study the radial swirl combustor using Computational Fluid Dynamics. The results of the study, that combined the *realizable k-ε* turbulence model with the *Eddy Dissipation* combustion model, found that the gas emission was recirculated into the toroidal flow core into the main combustion zone. The combustion cross section shows that a strong swirl produced a short and stable flame at distance z/D lower than 40%. From experiments, it was found that the NO_x emission formation was reduced by 20% when using high swirl compared to low swirl without recirculation zone. Other than that, the formation of other emissions such as Carbon Monoxide (CO) and unburned Hydro Carbon (HC) are low within the central recirculation zone for all high swirl flows. In addition, with pre-heating of intake air, the CO and HC emission were reduced by 23% compared to combustion without pre-heating. The measurement of emission also showed that excess Oxygen was lower with high swirl combustion compared to low swirl one. This proved that the combustion efficiency is higher with high swirl flow. The result of this research could be used to design new generation combustor that is sustainable and environmental friendly.

KANDUNGAN

BAB	PERKARA	MUKA SURAT
	PENGAKUAN	ii
	DEDIKASI	iii
	PENGHARGAAN	iv
	ABSTRAK	v
	ABSTRACT	vi
	KANDUNGAN	vii
	SENARAI JADUAL	xi
	SENARAI RAJAH	xii
	SENARAI SIMBOL	xix
	SENARAI LAMPIRAN	xxi
1	Pengenalan	1
	1.1 Latar belakang dan motivasi penyelidikan	1
	1.2 Kenyataan permasalahan	5
	1.3 Hipotesis kajian	6
	1.4 Objektif dan skop penyelidikan	7
	1.4.1 Objektif	7
	1.4.2 Skop Penyelidikan	7
	1.5 Sumbangan penyelidikan	8

1.6	Gariskasar Tesis	9
2	ULASAN KARYA DAN TEORI	10
2.1	Penggunaan aliran pusar dan kesan pusaran dalam pembakaran	10
2.1.1	Kesan-kesan utama aliran pusar	12
2.1.2	Ciri-ciri aliran pusar	13
2.1.3	Nombor Pusar, S_N	13
	2.1.3.1 Aliran pusaran lemah ($S_N < 0.6$)	16
	2.1.3.2 Aliran pusaran kuat ($S_N > 0.6$)	18
2.1.4	Perbezaan kesan pusaran antara keadaan aliran isoterma dan pembakaran	18
2.1.5	Zon edaran semula	20
	2.1.5.1 Kesan pusaran terhadap zon edaran semula	20
	2.1.5.2 Kesan geometri	22
2.1.6	Kejatuhan tekanan pemusar	23
2.2	Kesan pra-pemanasan udara masukan	25
2.3	Emisi dari Pembakar	28
	2.3.1 Karbon Monoksida (CO)	28
	2.3.2 Hidrokarbon tak terbakar (HC)	30
2.4	Emisi Oksida Nitrogen (NO_x)	31
	2.4.1 Faktor kimia dalam pembentukan NO_x	32
	2.4.2 Mekanisma Zeldovich	33
	2.4.3 Mekanisma Fenimore	36
	2.4.4 Pembentukan NO_x Bahan Api	38
2.5	Permodelan gelora dalam aliran pusar	40
	2.5.1 Ringkasan model aliran gelora	41
	2.5.2 Potensi penggunaan model gelora dalam aliran berpusar	44
2.6	Permodelan aliran tindakbalas (pembakaran)	50
	2.6.1 Model <i>Eddy Dissipation</i>	50
	2.6.2 Pecahan campuran: Model <i>equilibrium</i> dan Model <i>flamelet</i>	51

2.6.3	Potensi penggunaan model pembakaran	54
2.7	Pengiraan kepekatan emisi NO	58
2.8	Ulasan penyelidikan terkini	59
3	METODOLOGI PENYELIDIKAN	62
3.1	Pengenalan	62
3.2	Rekabentuk pemusar udara	63
3.3	Rekabentuk kebuk pembakar	66
3.3.1	Zon nyalaan	69
3.3.2	Nisbah bahan api udara (nisbah kesetaraan, ϕ)	69
3.3.3	Sistem penganalisis gas	71
3.3.4	Pengukuran emisi	72
3.3.5	Analisis ciri-ciri kimia bahan api berasaskan minyak sawit	74
3.4	Ujian garis dasar kebuk pembakaran	75
3.5	Proses penyelakuan berangka	79
3.5.1	Domain fizikal	79
3.5.2	Rekabentuk grid	80
3.5.3	Penumpuan dan kajian tak bersandar grid	81
3.5.4	Keadaan sempadan	83
3.5.5	Model aliran tindak balas / pembakaran	84
3.5.6	Penyelesai	85
4	ANALISIS KEPUTUSAN MODEL BERKOMPUTER	86
4.1	Pengenalan	86
4.2	Hubungan antara pekali discas dengan nombor Reynolds	88
4.3	Kesan kekuatan pusaran untuk aliran paksi	90
4.3.1	Kesan pelbagai sudut pemusar terhadap kekuatan pusaran	90
4.3.2	Kesan perubahan halaju terhadap kekuatan pusaran	98

4.3.3	Pengaruh kejatuhan tekanan terhadap nombor pusar (S_N)	102
4.4	Kesan kekuatan pusaran terhadap hasil pembakaran	103
4.4.1	Susuk suhu pembakaran tanpa pra-pemanasan	105
4.4.2	Susuk suhu pembakaran dengan pra-pemanasan	107
5	KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN HASIL UJIKAJI	113
5.1	Pengenalan	113
5.2	Kesan sudut pusar dan udara masukan bersuhu ambien terhadap emisi	115
5.3	Pembentukan emisi dengan pra-pemanasan	121
5.4	Pembentukan emisi dengan penggunaan bahan api berasaskan minyak sawit	135
6	KESIMPULAN DAN CADANGAN	151
6.1	Model penyelakuan untuk aliran berpusar	151
6.2	Kesan sudut pemusar terhadap kekuatan pusaran	153
6.3	Kesan sudut pemusar terhadap emisi pembakaran – model penyelakuan	154
6.4	Kesan sudut pemusar terhadap emisi pembakaran – ujikaji pembakaran	155
6.4.1	Pembakaran bahan api diesel	156
6.4.2	Pembakaran bahan api berasaskan bio	157
6.5	Cadangan penyelidikan pada masa akan datang	158
	RUJUKAN	159
	Lampiran A – D	170-178

SENARAI JADUAL

NO. JADUAL	TAJUK	MUKA SURAT
2.1	Oksida Nitrogen	32
2.2	Perbezaan Sifat Model Kelikatan Eddy (EVM) dan Model Tegasan Reynolds (RSM)	43
3.1	Maklumat lengkap rekabentuk pemusar aliran jejarian	65
3.2	Perbandingan reka bentuk pemusar antara penyelidik terdahulu	66
3.3	Perbandingan nisbah kesetaraan	70
3.4	Julat pengesanan dan kejituan penganalisa gas	72
3.5	Sifat-sifat adunan diesel dan RBDPO	75
3.6	Kadar aliran udara untuk penyelakuan isoterma	83
3.7	Kadar aliran bahan api dan udara untuk penyelakuan pembakaran	83
3.8	Set penyediaan bagi analisis model tanpa tindak balas	84

SENARAI RAJAH

NO. RAJAH	TAJUK	MUKA SURAT
2.1	Susuk biasa komponen halaju paksi dan pusar dalam medan pusaran	12
2.2	Bentuk aliran pusaran lemah	17
2.3	Taburan jejarian halaju paksi	17
2.4	Bentuk aliran pusaran kuat	18
2.5	Kesan Pra pemanasan udara pada masukan pembakar.	27
2.6	Pengaruh tekanan pembakaran terhadap emisi CO dan HC	31
2.7	Perkaitan emisi NO enjin dengan suhu masukan pembakar	35
2.8	Perbandingan data NO pada dua aras tekanan	35
2.9	Pengaruh masa mastautin terhadap NO _x dalam sistem bahan api udara pracampur	36
2.10	Rajah pembentukan NO menurut mekanisma Fenimore	38
2.11	Pengaruh kandungan bahan api bernitrogen terhadap sumbangan keseluruhan penghasilan NO _x	40
2.12	Halaju paksi ternormal pada garis tengah pembakar	45
2.13	Zon edaran semula berdasarkan data LDV dan ramalan CFD menggunakan pelbagai model aliran gelora	46
2.14	Perbandingan antara ramalan CFD dan data LDV untuk halaju paksi	47
2.15	Susuk halaju paksi	48
2.16	Ketumpatan emisi NO	49

2.17	Penerangan grafik berkaitan <i>probability density function</i> (PDF)	53
2.18	Kontur halaju genangan paksi	55
2.19	Kontur halaju genangan paksi	57
3.1	Skema rekabentuk pemusar aliran jejarian	65
3.2	Skematik reka bentuk kebuk pembakaran	67
3.3	Bentuk semburan bahan api pada pelbagai sudut	68
3.4	Butir-butir kedudukan salur ukuran melintang pada keratan rentas kebuk pembakar ($z / D = 0.2$ hingga 1.0) dari kerongkong pemusar	68
3.5	Jumlah penggunaan udara pembakaran untuk variasi nisbah kesetaraan, ϕ	71
3.6	Hubungan antara kuar persampelan tunggal dan kuar persampelan berganda	74
3.7	Ciri-ciri emisi NO_x pada pelbagai suhu kebuk pembakaran, pemusar 0° , tanpa pra-pemanasan udara	77
3.8	Ciri-ciri emisi CO pada pelbagai suhu kebuk pembakaran, pemusar 0° , tanpa pra-pemanasan udara	78
3.9	Imej nyalaan	78
3.10	Domain fizikal tak terkurung	80
3.11	Agihan jaringan sepanjang domain fizikal	81
3.12	Taburan halaju paksi di sepanjang garis tengah untuk jumlah lelaran yang berbeza	82
3.13	Taburan halaju paksi di sepanjang garis tengah untuk beberapa jumlah sel grid	82
4.1	Vektor halaju dalam zon edaran semula berpusat (CRZ)	88
4.2	Perkaitan antara C_D dan Re	90
4.3	Keputusan aliran halaju magnitud dari analisis CFD untuk pembakar dengan pemusar aliran jejarian yang berbeza	93
4.4	Keputusan ujikaji aliran halaju magnitud dibandingkan dengan analisis CFD untuk pembakar dengan pemusar aliran jejarian yang berbeza	93

4.5a	Keputusan aliran halaju paksi daripada analisis CFD untuk kebuk pembakar dengan pelbagai sudut pemusar (keratan rentas $z/D = 0.036$)	94
4.5b	Keputusan aliran halaju paksi daripada analisis CFD untuk kebuk pembakar dengan pelbagai sudut pemusar (keratan rentas $z/D = 0.072$)	94
4.5c	Keputusan aliran halaju paksi daripada analisis CFD untuk kebuk pembakar dengan pelbagai sudut pemusar (keratan rentas $z/D = 0.143$)	95
4.5d	Keputusan aliran halaju paksi daripada analisis CFD untuk kebuk pembakar dengan pelbagai sudut pemusar (keratan rentas $z/D = 0.286$)	95
4.6a	Keputusan aliran halaju paksi daripada analisis CFD untuk pembakar dengan pemusar 30° pada keratan rentas berbeza daripada kerongkong pemusar	96
4.6b	Keputusan aliran halaju paksi daripada analisis CFD untuk pembakar dengan pemusar 40° pada keratan rentas berbeza daripada kerongkong pemusar	96
4.6c	Keputusan aliran halaju paksi daripada analisis CFD untuk pembakar dengan pemusar 50° pada keratan rentas berbeza daripada kerongkong pemusar	97
4.6d	Keputusan aliran halaju paksi daripada analisis CFD untuk pembakar dengan pemusar 60° pada keratan rentas berbeza daripada kerongkong pemusar	97
4.7	Aliran paksi kebuk pembakar untuk pelbagai halaju masukan	99
4.8a	Aliran sepanjang garis jejarian kebuk untuk halaju masukan 30 m/s, pada keratan rentas berbeza, z/D	100
4.8b	Aliran sepanjang garis jejarian kebuk untuk halaju masukan 40 m/s, pada keratan rentas berbeza, z/D	100
4.8c	Aliran sepanjang garis jejarian kebuk untuk halaju masukan 50 m/s, pada keratan rentas berbeza, z/D	101
4.8d	Aliran sepanjang garis jejarian kebuk untuk halaju masukan 60 m/s, pada keratan rentas berbeza, z/D	101

4.9	Perbezaan halaju paksi sepanjang garis paksi kebuk pembakar	102
4.10	Jumlah peratus kehilangan tekanan untuk pelbagai pemusar	103
4.11	Keputusan ujikaji suhu pembakaran dibandingkan dengan analisis CFD untuk pembakar dengan pemusar yang berbeza sudut masukan	104
4.12	Kontur suhu sepanjang satah paksi pembakar dengan udara masukan bersuhu ambien (Skala dalam Kelvin)	105
4.13	Susuk suhu gas pada keratan rentas berbeza dengan udara masukan bersuhu ambien	106
4.14	Susuk suhu gas pada keratan rentas berbeza dengan 100K pra-pemanasan udara masukan	108
4.15	Kontur suhu sepanjang satah paksi pembakar dengan 100K pra-pemanasan udara masukan (Skala dalam Kelvin)	109
4.16	Susuk suhu gas pada keratan rentas berbeza dengan 150K pra-pemanasan udara masukan	109
4.17	Kontur suhu sepanjang keratan rentas pembakar dengan 150K pra-pemanasan udara masukan (Skala dalam Kelvin)	110
4.18	Susuk suhu gas pada keratan rentas berbeza dengan 250K pra-pemanasan udara masukan	110
4.19	Kontur suhu sepanjang keratan rentas pembakar dengan 250K pra-pemanasan udara masukan (Skala dalam Kelvin)	111
5.1	Susuk emisi CO arah jejarian pada keratan rentas berbeza dengan udara masukan bersuhu ambien	116
5.2	Susuk emisi NO _x arah jejarian pada keratan rentas berbeza dengan udara masukan bersuhu ambien	117
5.3	Susuk emisi HC arah jejarian pada keratan rentas berbeza dengan udara masukan bersuhu ambien	118
5.4	Lebihan kepekatan oksigen (O ₂)sepanjang pusat keratan rentas kebuk pembakar	119

5.5	Susuk emisi CO arah jejarian pada keratan rentas berbeza dengan pra-pemanasan udara masukan 100K	122
5.6	Susuk emisi CO arah jejarian pada keratan rentas berbeza dengan pra-pemanasan udara masukan 150K	123
5.7	Susuk emisi CO arah jejarian pada keratan rentas berbeza dengan pra-pemanasan udara masukan 250K	124
5.8	Susuk emisi NO _x arah jejarian pada keratan rentas berbeza dengan pra-pemanasan udara masukan 100K	125
5.9	Susuk emisi NO _x arah jejarian pada keratan rentas berbeza dengan pra-pemanasan udara masukan 150K	126
5.10	Susuk emisi NO _x arah jejarian pada keratan rentas berbeza dengan pra-pemanasan udara masukan 250K	127
5.11	Susuk emisi HC arah jejarian pada keratan rentas berbeza dengan pra-pemanasan udara masukan 100K	128
5.12	Susuk emisi HC arah jejarian pada keratan rentas berbeza dengan pra-pemanasan udara masukan 150K	129
5.13	Susuk emisi HC arah jejarian pada keratan rentas berbeza dengan pra-pemanasan udara masukan 250K	130
5.14	Lebihan kepekatan oksigen (O ₂) sepanjang pusat keratan rentas kebuk pembakar dengan pra-pemanasan udara masukan 100K	130
5.15	Lebihan kepekatan oksigen (O ₂) sepanjang pusat keratan rentas kebuk pembakar dengan pra-pemanasan udara masukan 150K	131
5.16	Lebihan kepekatan oksigen (O ₂) sepanjang pusat keratan rentas kebuk pembakar dengan pra-pemanasan udara masukan 250K	131
5.17	Susuk emisi dengan pelbagai suhu pra-pemanasan pada $z/D=0.8$ dan $r/R=0.0$	134
5.18	Susuk emisi CO arah jejarian pada keratan rentas berbeza dengan adunan 10% envo-diesel pada udara masukan ambien	136

5.19	Susuk emisi CO arah jejarian pada keratan rentas berbeza dengan adunan 15% envo-diesel pada udara masukan ambien	137
5.20	Susuk emisi CO arah jejarian pada keratan rentas berbeza dengan adunan 25% envo-diesel pada udara masukan ambien	138
5.21	Susuk emisi NO _x arah jejarian pada keratan rentas berbeza dengan adunan 10% envo-diesel pada udara masukan ambien	139
5.22	Susuk emisi NO _x arah jejarian pada keratan rentas berbeza dengan adunan 15% envo-diesel pada udara masukan ambien	140
5.23	Susuk emisi NO _x arah jejarian pada keratan rentas berbeza dengan adunan 25% envo-diesel pada udara masukan ambien	142
5.24	Susuk emisi HC arah jejarian pada keratan rentas berbeza dengan adunan 10% envo-diesel pada udara masukan ambien	143
5.25	Susuk emisi HC arah jejarian pada keratan rentas berbeza dengan adunan 15% envo-diesel pada udara masukan ambien	144
5.26	Susuk emisi HC arah jejarian pada keratan rentas berbeza dengan adunan 25% envo-diesel pada udara masukan ambien	145
5.27	Lebihan kepekatan oksigen (O ₂)sepanjang pusat keratan rentas kebuk pembakar dengan adunan 10% envo-diesel pada udara masukan ambien	145
5.28	Lebihan kepekatan oksigen (O ₂)sepanjang pusat keratan rentas kebuk pembakar dengan adunan 15% envo-diesel pada udara masukan ambien	146
5.29	Lebihan kepekatan oksigen (O ₂)sepanjang pusat keratan rentas kebuk pembakar dengan adunan 25% envo-diesel pada udara masukan ambien	146

- 5.30 Susuk emisi dengan pelbagai nisbah envo-diesel
dengan udara masukan ambien pada $z/D=0.8$
dan $r/R=0.0$

SENARAI SIMBOL

ε	-	epsilon
%	-	peratusan
ρ	-	ketumpatan
ϕ	-	nisbah kesetaraan
ΔP	-	beza tekanan
A_1	-	luas kebuk
A_2	-	luas kerongkong minimum
A_t	-	luas permukaan masukan tangen
A_{th}	-	luas permukaan kerongkong pemusar
C_C	-	pekali pengecutan
C_D	-	pekali discas
CFD	-	dinamik bendalir berkomputer
CH_4	-	metana
CO	-	karbon monoksida
CO_2	-	karbon dioksida
CRZ	-	zon edaran semula
CTRZ	-	zon edaran semula bergelang dan berpusat
d	-	diameter dalam
D	-	diameter global
DNS	-	Penyelakuan Berangka Lansung
E_A	-	tenaga pengaktifan
EVM	-	Model Kelikatan Eddy
f/a	-	nisbah bahan api udara
g	-	gram, pecutan graviti
H_2	-	hidrogen (gas)

H_2O	-	air
HC	-	hidrokarbon tak terbakar
K	-	Kelvin
kPa	-	kilo Pascal
LDV	-	<i>Laser Doppler velocimetry</i>
LES	-	Penyelakuan Eddy Besar
M	-	nombor Mach
mol	-	kemolaran
n	-	bilangan bilah
N_2	-	gas nitrogen
NO_x	-	oksida nitrogen
O_2	-	gas oksigen
$^{\circ}C$	-	darjah Celcius
ppm	-	bahagian per juta
r	-	jejari dalam
R_r	-	jejari global
R	-	pekali gas semesta
RANS	-	Reynolds Purata Navier-Stokes
r_e	-	jejari pusaran keluar
Re	-	nombor Reynolds
r_o	-	jejari masukan tangen
RSM	-	Model Tegasan Reynolds
S_N	-	nombor pusar
T	-	suhu global
t	-	tempoh mastautin
U	-	halaju global
u	-	komponen halaju arah paksi x
V	-	halaju akhir global
v	-	komponen halaju arah paksi y
w	-	komponen halaju arah paksi z
γ	-	nisbah haba tentu
RBDPO	-	Minyak Sawit Tertapis, Terluntur dan Dinyahbau

SENARAI LAMPIRAN

NO. LAMPIRAN	TAJUK	MUKA SURAT
A1	Kejatuhan tekanan pemusar	170
A2	Pekali discas	171
B1	Komposisi kimia bahan api (Analisis CHN)	172
B2	Penukaran nilai kalori kasar (Q_{gr}) kepada nilai kalori bersih (Q_{net})	172
C1	Reka bentuk pemusar aliran jejarian	173
C2	Reka bentuk pembakar berbahan api cecair	174
C3	Ujikaji pembakaran pemusar aliran jejarian (bahan api diesel)	174
C4	Ujikaji pembakaran pemusar aliran jejarian bahan api berasaskan bio)	177
D1	Senarai penerbitan jurnal	178

BAB 1

PENGENALAN

Bab ini terdiri daripada penerangan berkenaan latar belakang penyelidikan, pentakrifan masalah, objektif dan skop penyelidikan. Bahagian seterusnya adalah berkenaan sumbangan penyelidikan terhadap peningkatan ilmu dan ringkasan setiap bab diterangkan di akhir bab ini.

1.1 Latar belakang dan motivasi penyelidikan

Pembakar turbin gas secara asas terdiri daripada tiga zon. Pertama adalah zon utama, diikuti oleh zon pertengahan dan zon pencairan. Setiap zon memainkan peranan penting untuk mewujudkan pembakaran lengkap sebelum gas sampai ke bahagian ekzos. Peranan zon utama adalah untuk memastikan bahan api-udara bercampur dengan baik dan berlaku pembakaran lengkap. Oleh itu zon ini perlu menyediakan masa yang cukup dan aliran gelora yang tinggi untuk percampuran bahan api-udara di samping suhu pencucuhan yang optimum. Zon pertengahan adalah lanjutan daripada zon utama sebagai tambahan zon tindak balas bersuhu tinggi. Zon pencairan berperanan untuk memasukkan udara lebihan untuk keperluan

pembakaran dan pendinginan dinding pembakar serta menyediakan arus keluaran dengan suhu minimum yang sesuai untuk bilah turbin. Cabaran turbin gas yang paling sukar adalah untuk membakar sejumlah bahan api cecair daripada semburan muncung pengabusan. Ruang dan masa percampuran yang terhad adalah perkara yang perlu difikirkan oleh penyelidik kini kerana kesan emisi pembakaran bermula dari ruang ini.

Terdapat beberapa parameter yang perlu dianalisis di zon utama ini. Kelemahan percampuran bahan api-udara akan mengakibatkan pembakaran tidak lengkap dan seterusnya meningkatkan emisi karbon monoksida (CO) dan hidro karbon tak terbakar (HC). Masa mastautin percampuran bahan api cecair dan udara yang panjang akan meningkatkan suhu zon utama, maka emisi oksida nitrogen (NO_x) laluan haba akan meningkat. Oleh itu cabaran kajian ini adalah untuk mendapatkan penyelesaian yang akan menghasilkan pembakaran yang lengkap dengan cepat dan seterusnya menghasilkan emisi yang rendah terutamanya emisi NO_x .

Dalam mengurangkan emisi NO_x terdapat dua kaedah yang boleh digunakan untuk mengawal emisi NO_x dari alat pembakar. Pertama adalah menghalang pembentukan emisi nitrik oksida (NO) dan kaedah yang kedua adalah dengan melupuskan emisi NO daripada hasil pembakaran. Kaedah melupuskan emisi NO yang terhasil akan mengakibatkan peningkatan kos dari aspek sistem tambahan yang perlu disediakan dan bahan mentah yang akan digunakan. Oleh itu kaedah menghalang pembentukan NO yang merangkumi perubahan kepada reka bentuk dan operasi pembakar akan digunakan dalam kajian ini.

Penambahbaikan percampuran bahan api-udara adalah salah satu faktor yang menghasilkan pembakaran rendah NO_x (Lefebvre, 1998). Proses pengabusan dan aliran berpusar memberi kesan dominan dalam proses percampuran, pembakaran dan pembentukan emisi. Pemilihan pemusar yang betul akan meningkatkan tegasan ricih dan akan membantu pengabusan lebih halus pada semburan bahan api (Carvalho dan

Heitor, 1998). Beberapa pengkaji terdahulu telah menjalankan kajian tentang aliran udara berpusar dan peranannya dalam menambah baik percampuran, meningkatkan kecekapan pembakaran, mengawal pembentukan bahan cemar dan penyepaian lapisan bahan api cecair (Hadeef dan Lenze, 2005, 2008; Matsuura dan Kurosawa, 2005). Walau bagaimana pun semua kajian ini dijalankan dengan tekanan udara yang tinggi masuk ke dalam kebuk pembakar. Oleh itu percampuran bahan api-udara berlaku dalam tekanan kebuk melebihi tekanan atmosfera.

Tesis ini telah menganalisis kemampuan pemusar udara dengan pemboleh ubah kekuatan pusaran yang dapat memperbaiki percampuran bahan api cecair dan udara dan mengawal pembentukan bahan cemar ketika dioperasikan dalam tekanan ambien. Kebuk pembakar yang digunakan adalah jenis tak terkurung dan terdedah kepada atmosfera. Pembakar jenis ini banyak digunakan dalam dandang industri dan ketuhar pengeringan. Kajian ini akan meliputi proses pencampuran terutamanya bahan api yang berkualiti rendah tetapi mempunyai kesan positif ke atas proses pembakaran dan pengurangan pembentukan emisi terutamanya NO_x . Di samping itu ianya juga bertujuan untuk mereka bentuk satu sistem boleh suai dan cekap untuk pembakaran pelbagai jenis bahan api cecair.

Dalam sistem pembakaran tanpa pra-campur, bahan api dan udara diagih secara berasingan dan percampuran bahan api-udara berlaku sebelum tindak balas kimia. Didapati juga aerodinamik pembakar adalah faktor dominan yang telah diterima oleh penyelidik terdahulu yang mempengaruhi prestasi pembakar dan pelepasan emisi NO_x (Al-kabie, 1989). Maka kesan kekuatan pusaran udara akan dikaji dan dijelaskan peranannya dalam percampuran bahan api dalam sistem pembakaran.

Tahap pusaran dalam kebuk pembakar memberi kesan besar ke atas penyebaran secara jejarian zarah titisan bahan api kerana momentum tangen yang memberi kesan terhadap saiz zarah tersebut dan akhirnya akan membantu proses pengabusan (Rho dan lain lain, 1998). Maka faktor yang paling penting yang

mempengaruhi taburan titisan dan pengabusan adalah halaju dan pusaran yang optimum.

Aliran pusar akan dimasukkan ke dalam kebuk pembakar melalui pemusar udara di mana udara akan dipaksa menukar laluannya dari arah paksi kepada komponen arah tangen. Halaju tangen akan menjana daya jejarian (daya empar) yang akan menolak udara ke hilir dan menghasilkan aliran pemisahan berbentuk pilin. Oleh itu zon tekanan rendah diteras aliran akan dihasilkan dan mengakibatkan zon edaran semula terbentuk (Stein dan Kempf, 2007). Zon edaran semula memainkan peranan utama dalam proses penstabilan nyalaan dengan bertindak sebagai takungan untuk haba dan spesis kimia aktif. Zon ini juga mengangkut haba dan jisim campuran mudah terbakar kepada udara-bahan api yang masih segar ke dalam ruang pembakaran (Coats dan lain-lain, 2000; Huang dan Yang, 2005; El-Asrag dan Menon, 2007).

Oleh kerana percampuran bahan api-udara dapat ditingkatkan dengan bantuan aliran pusar dan dengan penyediaan zon edaran semula yang dapat menstabilkan nyalaan maka pembakaran akan berlaku dengan pantas. Pembakaran yang pantas akan mengurangkan tempoh suhu puncak tindak balas dan pengurangan masa mastautin gas dalam zon edaran semula. Oleh itu kesan yang paling ketara adalah emisi NO_x akan dikurangkan (Frassoldati dan lain-lain, 2005; Schmittel dan lain-lain, 2000)

Perlaksanaan kajian ini adalah gabungan permodelan berkomputer menggunakan perisian pakej Ansys Fluent 14 dan ujikaji yang dijalankan di makmal. Permasalahan akan dikaji dengan pengubahsuaian pembakar industri piawai untuk memperbaiki reka bentuknya dan seterusnya menyumbang kepada pembakaran yang lebih baik. Permodelan komputer akan melibatkan analisis isoterma dan permodelan tindak balas (pembakaran) sementara itu ujikaji akan memberi lebih tumpuan kepada analisis pembakaran.

1.1 Kenyataan permasalahan

Kelemahan pengabusan bahan api dan ditambah dengan kesukaran percampuran bahan api cecair dalam tekanan ambien dengan udara dalam masa yang singkat didapati meningkatkan pembentukan NO_x dan emisi-emisi lain. Ketika ini kaedah-kaedah yang digunapakai untuk mengurangkan pelepasan emisi daripada pembakaran pembakar dapat dibahagikan kepada dua jenis. Pertama pengubahsuaian kaedah pembakaran dan yang kedua rawatan pasca-pembakaran. Pengubahsuaian kaedah pembakaran mengurangkan penghasilan NO_x dengan mengubah suhu puncak nyalaan, nisbah kesetaraan dan kaedah percampuran bahan api-udara. Sementara itu, teknologi pengurangan emisi pada pasca-pembakaran adalah berkenaan rawatan gas ekzos sebelum terlepas ke atmosfera. Kaedah ini akan meningkatkan kos disebabkan penyelenggaraan dan penggunaan bahan mentah untuk rawatan.

Dalam kajian ini, pengubahsuaian kaedah pembakaran akan diperkenalkan untuk menghalang pembentukan emisi oksida nitrogen (NO_x). Percampuran bahan api-udara akan dibantu dengan aliran pusar daripada pemusar aliran jejarian. Kaedah ini sesuai digunakan untuk pembakar yang kecil dan ringan kerana kaedah ini hanya merangkumi perubahan kecil kepada reka bentuk dan operasi pembakar sedia ada tanpa pertambahan komponen yang besar. Fokus kajian adalah untuk menyelesaikan masalah pembakaran menggunakan bahan api cecair dengan kemasukan udara utama secara jejarian yang bertekanan ambien dalam kebuk pembakar tak terkurung. Setakat ini belum ada lagi kajian secara mendalam oleh penyelidik terdahulu dalam menyelesaikan permasalahan ini. Perkara ini penting kerana dalam aplikasi pembakar industri masa kini, mereka berhadapan dengan masalah percampuran bahan api udara. Kebanyakan pembakar industri menggunakan pemusar aliran paksi. Aliran udara arah paksi hanya dilencongkan oleh sudut bilah paksi. Maka aliran vektor akan terhasil. Oleh kerana semburan bahan api selari dengan arah aliran udara utama ditambah dengan halaju udara kemasukan yang tinggi, nyalaan yang terhasil akan menjadi panjang dan pembakaran lengkap sukar diperolehi. Oleh itu persoalan kajian dalam penyelidikan ini adalah; Bagaimanakah pemusar aliran jejarian menyelesaikan permasalahan percampuran bahan api cecair dari nozel semburan

pada tekanan udara bekalan ambien dan seterusnya memperolehi pembakaran yang lengkap, nyalaan yang stabil dan pembentukan emisi yang rendah.

1.2 Hipotesis kajian

Kajian ini akan memberi fokus terhadap hasil pembakaran dengan penggunaan pemusar aliran jejarian sebagai kaedah bekalan udara utama terhadap percampuran bahan api cecair dari nozel semburan. Aliran dalam kajian ini akan dibahagikan kepada dua. Aliran bahan api cecair akan disebarkan pada aliran paksi dan aliran udara utama pula adalah pada arah jejarian secara berpusar melalui bilah pandu bersudut. Dapatan awal mendapati aliran paksi akan mengalami gangguan daripada aliran udara pada arah tangen. Pusaran dari arah tangen ini akan mewujudkan aliran pusaran yang akan membentuk aliran gelora berbentuk pilin. Aliran ini akan bergerak ke hilir daripada kerongkong pemusar. Pembentukan aliran gelora ini akan mewujudkan satu zon bertekanan rendah di teras berhadapan dengan kerongkong pemusar. Kewujudan zon ini akan menyebabkan berlakunya aliran edaran semula. Aliran ini didapati mampu mengalirkan semula spesies kimia untuk membantu pembakaran dan juga boleh bertindak sebagai takungan haba untuk menstabilkan nyalaan. Oleh itu nyalaan akan lebih cepat stabil dan mempunyai keamatan yang tinggi. Dengan keadaan ini, pembakaran lengkap akan cepat berlaku dan hasilnya nyalaan akan lebih pendek. Nyalaan pendek akan mengurangkan tompok panas dalam zon nyalaan. Pengurangan tompok panas ini akan membantu menghalang pembentukan NO_x terma. Oleh itu emisi ini dapat dikurangkan. Selain itu juga kajian ini akan menganalisis sudut pusaran optimum yang diperlukan untuk menghasilkan pembakaran terbaik. Sudut pusaran akan mempengaruhi nombor pusar, S_N . Semakin besar nombor pusar akan mengakibatkan kejatuhan tekanan yang tinggi. Kejatuhan tekanan yang tinggi akan memberi tekanan pula kepada pembekal udara (*air blower*) disebabkan oleh aliran balikan.

1.4 Objektif dan skop penyelidikan

1.4.1 Objektif

Objektif utama penyelidikan ini adalah untuk mendapatkan susun atur pemusar yang optimum yang membolehkan bahan api cecair daripada nozel pengabusan bercampur dengan udara sebelum nyalaan. Bagi mencapai matlamat ini, sub-objektif berikut telah dikenal pasti:

- i. Menjalankan analisis penyelakuan sejuk dan tindakbalas (pembakaran) untuk model tiga dimensi pemusar udara aliran jejarian dalam pembakar berbahan api cecair dalam kebuk tak terkurung.
- ii. Menilai prestasi pemusar udara di dalam pembakar di atas secara ujikaji dari aspek pembentukan pencemaran menggunakan bahan api diesel dan bahan api berasaskan minyak sawit.

1.4.2 Skop Penyelidikan

Penyelidikan ini dijalankan dengan berpandukan skop-skop di bawah:

- i. Analisis penyelakuan menggunakan perisian pakej *Ansys Fluent* ke atas reka bentuk pemusar meliputi analisis secara sejuk dan pembakaran. Kajian dihadkan kepada ruang $z/D \leq 1.0$.

- ii. Prestasi penyelakuan tindak balas pemusar udara dalam kebuk pembakar tak terkurung hanya dinilai menerusi pembentukan emisi karbon monoksida (CO) dan oksida nitrogen (NO_x).
- iii. Sistem pembakaran semburan bahan api cecair telah dibangunkan pada skala makmal untuk menguji prestasi pemusar aliran jejarian secara ujikaji pada keadaan stoikiometri.
- iv. Penilaian prestasi pembakaran secara ujikaji dihadkan kepada ruang $z/D \leq 1.0$ dan hanya memfokuskan emisi CO, NO_x dan hidrokarbon tak terbakar (HC).

1.5 Sumbangan penyelidikan

Kajian ini bertujuan untuk meningkatkan kemampuan pembakar semburan bahan api cecair untuk memperoleh percampuran terbaik antara bahan api udara pada tekanan ambien. Dengan percampuran yang optimum maka pembakaran akan menghasilkan nyalaan yang stabil dan pembentukan emisi yang rendah. Kajian ini telah memberi sumbangan terhadap bidang pembakaran bahan api cecair. Antara sumbangan yang diperolehi adalah seperti di bawah:

- i. Pembangunan reka bentuk pemusar aliran jejarian untuk pembakar industri yang berkeupayaan memperbaiki percampuran bahan api cecair dan udara pada tekanan ambien.
- ii. Pemusar ini berkemampuan mengekalkan nombor pusar walaupun dengan pertambahan nombor Reynolds. Oleh itu pemusar ini mampu membekalkan udara gelora yang cukup kuat untuk membantu penghasilan nyalaan yang stabil, cepat dan seterusnya merendahkan pembentukan bahan cemar.
- iii. Pembakar juga berkemampuan untuk menghasilkan nyalaan yang stabil untuk bahan api berasaskan minyak sawit yang mempunyai kelikatan yang tinggi dan nilai kalori yang rendah.

1.6 Gariskasar tesis

Tesis ini terdiri daripada 6 bab yang telah disusun seperti di bawah:

Bab 2 merangkumi kajian literatur berkenaan beberapa keadaan mekanisma pembentukan emisi NO_x , CO dan emisi-emisi lain, peranan aliran pusar dalam meningkatkan kecekapan pembakaran dan seterusnya mengurangkan pembentukan pencemaran pada keadaan tekanan ambien, udara bersuhu bilik dan dengan pra-pemanasan udara aliran utama. Selain itu bab ini juga membincangkan penggunaan model-model penyelakuan untuk aliran gelora dan aliran tindak balas (pembakaran). Pemilihan model yang sesuai adalah berdasarkan kesimpulan penyelidik-penyelidik terdahulu. Bab 3 adalah penerangan terperinci berkenaan penyediaan rig ujikaji dan prosedur ujikaji dan penyediaan model penyelakuan untuk analisis oleh perisian *Ansys Fluent*. Perbincangan keputusan penyelakuan ke atas model pemusar udara terdapat di bab 4 yang terdiri daripada perbincangan berkenaan kesan aliran pusar dari segi prestasi semasa keadaan sejuk dan ketika analisis tindak balas dijalankan. Bab 5 membincangkan keputusan ujikaji pembakar menggunakan pemusar aliran jejarian pada bekalan udara bersuhu ambien, pra-pemanasan udara masukan utama dan penggunaan bahan api berasaskan minyak sawit yang berbeza adunan. Akhir sekali, bab 6 iaitu kesimpulan penyelidikan dan pembaikan-pembaikan yang dapat dibuat pada masa yang akan datang dalam penyelidikan ini.

RUJUKAN

- Ahmad, N. T., Andrews, G. E., Kowkabi, M., & Sharif, S. F. (1985). Centrifugal mixing in gas and liquid fuelled lean swirl stabilized primary zones (No. CONF-8509221-). American Society of Mechanical Engineers, New York, NY.
- Al Dabbagh, N. T. and Andrews, G. E., Weak Extinction and Turbulent Burning for Grid Plate Stabilised Premixed Flames, *Combustion and Flame*, Vol. 55, 1984.
- Al-Fawaz, A. D., Dearden, L. M., Hedley, J. T., Missaghi, M., Pourkashanian, M., Williams, A., & Yap, L. T. (1994, December). NO_x formation in geometrically scaled gas-fired industrial burners. In *Symposium (International) on Combustion* (Vol. 25, No. 1, pp. 1027-1034). Elsevier.
- Al-Kabie, H. S. (1989). Radial Swirlers for Low Emissions Gas Turbine Combustion. University of Leeds, Dept. of Fuel & Energy: PhD.
- Andrews, G. E., Escott, N., & Mkpadi, M. C. (2008, January). Radial Swirler Designs for Ultra-Low NO_x Gas Turbine Combustion. In *ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air* (pp. 277-289). American Society of Mechanical Engineers.
- ANSYS, *Fluent 14.0 Documentation: Theory Guide*. 2012.
- Bahr, D. W. (1973). Technology for the reduction of aircraft turbine engine exhaust emissions. 1973. 13.
- Beer, J. M. (1996). Low NO_x burners for boilers, furnaces and gas turbines; drive towards the lower bounds of NO_x emissions. *Combustion science and technology*, 121(1-6), 169-191.

- Beer, J. M., & Chigier, N. A. Combustion Aerodynamics. 1972. Applied Science Publ. London.
- Beltagui, S. A., & Macallum, N. (1988). Characteristics of enclosed swirl flames with peripheral fuel injection. *Journal of the Institute of Energy*, 61(446), 3-16.
- Betagui, S. A. and MacCallum, N. R. L. (1976). Aerodynamics of Vane Swirled Flames in Furnaces, *J. Inst. Fuel*, 49, pp. 183-193.
- Beyler, C. L. and Gouldin, F. C. (1981). Flame Structure in a Swirling Stabilised Combustor Inferred by Radiant Emissions Measurement, 18thSymposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 1011-1019.
- Bilger, R. W. (2000). Future progress in turbulent combustion research. *Progress in energy and combustion science*, 26(4), 367-380.
- Bowman, C. T. (1992, December). Control of combustion-generated nitrogen oxide emissions: technology driven by regulation. In *Symposium (International) on Combustion* (Vol. 24, No. 1, pp. 859-878). Elsevier.
- British Standards Institution, 1981 (Oil Burning Equipment” Part 2. Vaporizing Burners.
- Brum, R. D. and Samuelsen, G. S. (1982). Two Component Laser Anemometry Measurements in Non-Reacting and Reacting Complex Flow Model Combustor, Western States Section / The Laboratories, Livermore, CA.
- Buriko, Y. Y., & Kuznetsov, V. R. (1978). Possible mechanism of the formation of nitrogen oxides in turbulent diffusional combustion. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 14(3), 296-303.
- Carvalho, I. S., & Heitor, M. V. (1998). Liquid film break-up in a model of a prefilming airblast nozzle. *Experiments in fluids*, 24(5-6), 408-415.
- Cheng, T. S., Chao, Y. C., Wu, D. C., Yuan, T., Lu, C. C., Cheng, C. K., & Chang, J. M. (1998, December). Effects of fuel-air mixing on flame structures and NO_x emissions in swirling methane jet flames. In *Symposium (International) on Combustion* (Vol. 27, No. 1, pp. 1229-1237). Elsevier.
- Chigier, N. A. and Dvorak, K. (1975). Laser Anemometer Measurements in Flames with Swirl, 15thSymposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 573-585.

- Chigier, N. A. (1972). Gas Dynamics of Swirling Flow in Combustion Systems, *Astronautica Acta*, 17, pp. 387-395.
- Claypole, T. C. and Syred, N., The Stabilisation of Flames in Swirl Combustor, *J. Inst. Energy*, 55, pp. 14-19, 1982.
- Clement, T. R., Effect of Swirling Flow on Augmentor Performance; Phase 1 and 2, NASA-CR-134639, 1974 and NASA CR-135024, 1976
- Coats, C. M., Richardson, A. P., & Wang, S. (2000). Nonpremixed combustion in turbulent mixing layers part 2: recirculation, mixing and flame stabilization. *Combustion and flame*, 122(3), 271-290.
- Dean, A. J., Hanson, R. K., & Bowman, C. T. (1991, December). High temperature shock tube study of reactions of CH and C-atoms with N₂. In *Symposium (International) on Combustion* (Vol. 23, No. 1, pp. 259-265). Elsevier.
- Delavan, (2000), "A Total Look at Oil Burner Nozzles", Delavan Spray Technologies: Fuel Metering Production Operation, South Carolina.
- Dibble, R. W., Warnatz, J., & Maas, U. (1996). Combustion: physical and chemical fundamentals, modelling and simulations, experiments, pollutant formation.
- Ditaranto, M. & Sautet, J. C. (2001). Structural aspects of coaxial oxy-fuel flames. *Experiments in fluids*, 30(3), 253-261.
- Dryer, F. L., & Glassman, I. (1973, December). High-temperature oxidation of CO and CH₄. In *Symposium (International) on combustion* (Vol. 14, No. 1, pp. 987-1003). Elsevier.
- Durox, D., Moeck, J. P., Bourgoign, J. F., Morenton, P., Viallon, M., Schuller, T., & Candel, S. (2013). Flame dynamics of a variable swirl number system and instability control. *Combustion and Flame*, 160(9), 1729-1742.
- Edwards, J. B. (1974). Combustion: the formation and emission of trace species. Ann Arbor Science.
- El-Asrag, H., & Menon, S. (2007). Large eddy simulation of bluff-body stabilized swirling non-premixed flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 31(2), 1747-1754.
- Eldrainy, Y. A., Ahmad, M. F., & Jaafar, M. N. M. (2009). Investigation of radial swirler effect on flow pattern inside a gas turbine combustor. *Modern Applied Science*, 3(5), P21.

- Eldrainy, Y. A., Aly, H. S., Saqr, K. M., & Jaafar, M. N. M. (2010). A Multiple Inlet Swirler for Gas Turbine Combustors. *International Journal of Mechanical Systems Science & Engineering*, 2(2).
- Escott, N.H.,(1993), Ultra Low NO_x Gas Turbine Combustion Chamber Design, University of Leeds, Department of Fuel and Energy, PhD.
- Eskinazi, D., Cichanowicz, J. E., Linak, W. P., & Hall, R. E. (1989). Stationary Combustion NO_x Control A Summary of the 1989 Symposium. JAPCA, 39(8), 1131-1139.
- Fenimore, C. P. (1971, December). Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames. In Symposium (International) on Combustion (Vol. 13, No. 1, pp. 373-380). Elsevier.
- Fernandes, E. C., Heitor, M. V., & Shtork, S. I. (2006). An analysis of unsteady highly turbulent swirling flow in a model vortex combustor. *Experiments in Fluids*, 40(2), 177-187.
- Fluent Inc. (2003). *Fluent 6.1 User Guide*, Lebanon: Fluent Inc.
- Frassoldati, A., Frigerio, S., Colombo, E., Inzoli, F., & Faravelli, T. (2005). Determination of NO_x emissions from strong swirling confined flames with an integrated CFD-based procedure. *Chemical Engineering Science*, 60(11), 2851-2869.
- Fricker, N. and Leuckel, W., The Characteristic of Swirl Stabilized Natural Gas Flame Part 3: The Effect of Swirl and Burner Mouth Geometry on Flame Stability, J. Inst. Furl, 49, pp. 152-158, 1976.
- Friedrich, R., & Peinke, J. (2009). Fluid Dynamics, Turbulence. In Encyclopedia of Complexity and Systems Science (pp. 3641-3661). Springer New York.
- Fudihara, T. J., Goldstein Jr, L., & Mori, M. (2007). A numerical investigation of the aerodynamics of a furnace with a movable block burner. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 24(2), 233-248.
- Gouldin, F. C., Depsky, J. S. and Lee, S. L., Velocity Field Characteristics of a Swirling Flow Combustor, AIAA, 21st Aerospace Science Meeting, Reno, Nev., Jan, 99. 10-13, 1999.
- Griffiths, J. F., & Barnard, J. A. (1995). Flame and combustion (Vol. 3). Blackie Academic & Professional.

- Gupta, A. K. (2000, March). Thermal characteristics of gaseous fuel flames using high temperature air. In Proc. CREST 3rd International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gasification, Yokohama, Japan (pp. B1-1).
- Gupta, A. K., & Li, Z. (1997, November). Effect of fuel property on the structure of highly preheated air flames. In Proc. Joint Power Generation Conference (JPGC) (Vol. 1, pp. 2-5).
- Gupta, A. K., Bolz, S., & Hasegawa, T. (1999). Effect of air preheat temperature and oxygen concentration on flame structure and emission. *Journal of energy resources technology*, 121(3), 209-216.
- Gupta, A. K., Lewis, M. J., & Daurer, M. (2001). Swirl effects on combustion characteristics of premixed flames. *Journal of engineering for gas turbines and power*, 123(3), 619-626.
- Gupta, A. K., Lilley, D. G. and Syred, N., *Swirl Flows*, Abacus Press, Tunbridge Wells, England, 1984.
- Hadef, R., & Lenze, B. (2008). Effects of co-and counter-swirl on the droplet characteristics in a spray flame. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(12), 2209-2217.
- Hall, M. G., Vortex Breakdown, A Review, *Fluid Mech.*, 4, pp. 195-217, 1972.
- Hasegawa, T., & Tanaka, R. (1998). High temperature air combustion: Revolution in combustion technology (part I: New findings on high temperature air combustion). *JSME international journal. Series B, fluids and thermal engineering*, 41(4), 1079-1084.
- Hasegawa, T., Mochida, S., & Gupta, A. K. (2002). Development of advanced industrial furnace using highly preheated combustion air. *Journal of propulsion and power*, 18(2), 233-239.
- Heberling, P. V. (1977, December). "Prompt no" measurements at high pressures. In *Symposium (International) on Combustion* (Vol. 16, No. 1, pp. 159-168). Elsevier.
- Heitor, M. V. (1989). Velocity and Scalar Measurements in Model and Real Gas Turbine Combustors. In *Instrumentation for combustion and flow in engines* (pp. 1-44). Springer Netherlands.
- Heitor, M. V., & Whitelaw, J. H. (1986). Velocity, temperature, and species characteristics of the flow in a gas-turbine combustor. *Combustion and Flame*, 64(1), 1-32.

- Hjertager, L. K., Hjertager, B. H., & Solberg, T. (2002). CFD modelling of fast chemical reactions in turbulent liquid flows. *Computers & Chemical Engineering*, 26(4), 507-515.
- Hsiao, G., & Mongia, H. C. (2003). Swirl cup modeling part 3: grid independent solution with different turbulence models. AIAA Paper, 1349(2)).
- Huang, Y., & Yang, V. (2005). Effect of swirl on combustion dynamics in a lean-premixed swirl-stabilized combustor. *Proceedings of the Combustion Institute*, 30(2), 1775-1782.
- Ishak, M.S.A., Jaafar, M.N.M., Saharin, S. 2010. Removal of NO_x and CO from a Burner System. *Environmental Science and Technology*. 44 (8): 3111-3115.
- Ishida, T., Davidson, P. A., & Kaneda, Y. (2006). On the decay of isotropic turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 564, 455-475.
- Iverach, D., Basden, K. S., & Kirov, N. Y. (1973, December). Formation of nitric oxide in fuel-lean and fuel-rich flames. In Symposium (International) on Combustion (Vol. 14, No. 1, pp. 767-775). Elsevier.
- Jones, W. P. & Wilhelmi, J. (1989). Velocity, temperature and composition measurements in a confined swirl driven recirculating flow. *Combustion Science and Technology*, 63(1-3), 13-31.
- Jones, W., & Whitelaw, J. H. (1982). Calculation methods for reacting turbulent flows: A review. *Combustion and flame*, 48, 1-26.
- Kalam, M. A., & Masjuki, H. H. (2011). Experimental Test of a Diesel Engine using Envo-Diesel as an Alternative Fuel. *New Trends and Developments in Automotive System Engineering*, InTech Publishers.
- Khalil, A. E., & Gupta, A. K. (2011). Distributed swirl combustion for gas turbine application. *Applied Energy*, 88(12), 4898-4907.
- Kim, M. N. (1995). Design of Low NO_x Gas Turbine Combustion Chamber. University of Leeds, Dept. of Fuel & Energy, PhD.
- King, P. T., Andrews, G. E., Pourkashanian, M. M., & McIntosh, A. C. (2012, June). Nitric Oxide Predictions for Low NO_x Radial Swirlers With Central Fuel Injection Using CFD. In ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition (pp. 985-993). American Society of Mechanical Engineers.
- Kyne, A. G., Pourkashanian, M., Wilson, C. W., & Williams, A. (2002, January). Validation of a flamelet approach to modelling 3-D turbulent combustion

- within an airspray combustor. In ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air (pp. 591-600). American Society of Mechanical Engineers.
- Launder, B. E. (1989). Second-moment closure: present... and future?. *International Journal of Heat and fluid flow*, 10(4), 282-300.
- Launder, B. E., and Spalding, D. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 3(2), 269-289.
- Lefebvre, A. H. (1995). The role of fuel preparation in low-emission combustion. *Journal of engineering for gas turbines and power*, 117(4), 617-654.
- Lefebvre, A. H. (1998). *Gas turbine combustion*. CRC Press.
- Lefebvre, A. H. *Gas turbine combustion*, 1983. Hemisphere, Washington, DC.
- Li, G., Gutmark, E. J., Stankovic, D., Overman, N., Cornwell, M., Fuchs, L., & Vladimir, M. (2006). Experimental study of flameless combustion in gas turbine combustors. In 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Paper no. AIAA (Vol. 546).
- Liang, H., & Maxworthy, T. (2005). An experimental investigation of swirling jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 525, 115-159.
- Lilley, D. G., Nonisotropic Turbulence in Swirling Flows, *Acta. Astr.*, 3, pp. 919-993, 1980.
- Lilley, D. G., Primitive Pressure – Velocity Code for the Computation of Strongly Swirling Flows, *AIAA J*, 14, pp. 749-756, 1976.
- Lilley, D. G., Swirl Flows in Combustion; A review, *AAA Journal*, Vol. 15, No. 8, pp.1063-1078, August, 1977.
- Lim, S., & Teong, L. K. (2010). Recent trends, opportunities and challenges of biodiesel in Malaysia: an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 938-954.
- Lindackers, D., Burmeister, M., & Roth, P. (1991, December). Pertubation studies of high temperature C and CH reactions with N₂ and NO. In *Symposium (International) on Combustion* (Vol. 23, No. 1, pp. 251-257). Elsevier.
- Magnussen, B. F., & Hjertager, B. H. (1977, December). On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. In *Symposium (International) on Combustion* (Vol. 16, No. 1, pp. 719-729). Elsevier.

- Mathur, M. L. and MacCallum, N. R. L., Swirling Air Jets Issuing from Vane Swirlers Part 1: Free Jets, *J. Inst. Fuel*, 40, pp. 214-225, 1967.
- Matsuura, K., & Kurosawa, Y. (2005). Effect of swirl combinations on spray dispersion characteristics of a multi-swirler airblast atomizer. *Proc. ILASS*.
- McDonell, V. G., & Samuelson, G. S. (1995). An experimental data base for the computational fluid dynamics of reacting and nonreacting methanol sprays. *Journal of fluids engineering*, 117(1), 145-153.
- McGuirk, J. J., & Palma, J. M. L. M. (1995). Experimental investigation of the flow inside a water model of a gas turbine combustor: part 1—mean and turbulent flowfield. *Journal of fluids engineering*, 117(3), 450-458.
- Menzies, K. R. (2005). An evaluation of turbulence models for the isothermal flow in a gas turbine combustion system. In 6th International Symposium on Engineering Turbulence Modeling and Experiments.
- Miller, J. A., & Bowman, C. T. (1989). Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 15(4), 287-338.
- Miyauchi, T., Mori, Y., & Imamura, A. (1977, December). A study of nitric oxide formation in fuel-rich hydrocarbon flames: role of cyanide species, H, OH and O. In *Symposium (International) on Combustion* (Vol. 16, No. 1, pp. 1073-1082). Elsevier.
- Nagano, Y. and Y. Itazu, (1997). Renormalization group theory for turbulence: Assessment of the Yakhot-Orszag-Smith theory. *Fluid Dynamics Research*, 20(1-6): p. 157-172.
- Nichols, K. M., Thompson, L. M., & Empie, H. J. (1993). A review of NO_x formation mechanisms in recovery furnaces. *Tappi journal*, 76(1), 119-124.
- Nisbet, J., Davidson, L., & Olsson, E. (1992). Analysis of two fast-chemistry combustion models and turbulence modeling in variable density flow. *Comput Fluid Dyn*, 1, 557-563.
- Novick, A. S., Miles, G. A. and Lilley, D. G., Numerical Simulation of Combustor Flow fields; A Primitive Variable Design Capability, *J. Energy*, 3, pp 95-105, 1979.
- Olivani, A., Solero, G., Cozzi, F., & Coghe, A. (2007). Near field flow structure of isothermal swirling flows and reacting non-premixed swirling flames. *Experimental thermal and fluid science*, 31(5), 427-436.

- Pashtrapanska, M., Jovanović, J., Lienhart, H., & Durst, F. (2006). Turbulence measurements in a swirling pipe flow. *Experiments in fluids*, 41(5), 813-827.
- Patankar, S. V., & Spalding, D. B. (1972). A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 15(10), 1787-1806.
- Peters, N. (1984). Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion. *Progress in energy and combustion science*, 10(3), 319-339.
- Peters, N. (1988, December). Laminar flamelet concepts in turbulent combustion. In *Symposium (International) on Combustion* (Vol. 21, No. 1, pp. 1231-1250). Elsevier.
- Pollard, A., Ozem, H. L. M., & Grandmaison, E. W. (2005). Turbulent, swirling flow over an axisymmetric, constant radius surface. *Experimental thermal and fluid science*, 29(4), 493-509.
- Reynolds, O., (1883). An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels. *Proceedings of the Royal Society of London*, 35(224-226): p. 84.
- Rho, B. J., Kang, S. J., Oh, J. H., & Lee, S. G. (1998). Swirl effect on the spray characteristics of a twin-fluid jet. *KSME International Journal*, 12(5), 899-906.
- Roffe, G., & Venkataramani, K. S. (1978). Emission Measurements for a Lean Premixed Propane Air System at Pressures Up to 30 Atmospheres. National Aeronautics and Space Administration.
- Rose, J. W., Spiers, H. M., & Cooper, J. R. (Eds.). (1977). Technical data on fuel. British National Committee, World Energy Conference.
- Roux, S., Lartigue, G., Poinot, T., Meier, U., & Bérat, C. (2005). Studies of mean and unsteady flow in a swirled combustor using experiments, acoustic analysis, and large eddy simulations. *Combustion and Flame*, 141(1), 40-54.
- Salas, M.D., J.N. Hefner, and L. Sakell, (1999). Modeling complex turbulent flows. Vol. 7.: Springer Netherlands.
- Schmittl, P., Günther, B., Lenze, B., Leuckel, W., & Bockhorn, H. (2000). Turbulent swirling flames: Experimental investigation of the flow field and formation of nitrogen oxide. *Proceedings of the Combustion Institute*, 28(1), 303-309.

- Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., & Zhu, J. (1995). A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, 24(3), 227-238.
- Simmie, J. M. (2003). Detailed chemical kinetic models for the combustion of hydrocarbon fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29(6), 599-634.
- Stein, O., & Kempf, A. (2007). LES of the Sydney swirl flame series: A study of vortex breakdown in isothermal and reacting flows. *Proceedings of the Combustion Institute*, 31(2), 1755-1763.
- Sullivan, D. A. (1977). A Simple Gas Turbine Combustor NO_x Correlation Including the Effect of Vitiated Air. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 99(2), 145-152.
- Syred, N. (2006). A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 32(2), 93-161.
- Syred, N. and Beer, J. M., Combustion in Swirling Flow; A Review, *Combustion and Flame*, 23, pp. 143-201, 1974.
- Syred, N. and Dahman, K. R., Effect of High Confinement upon the Aerodynamics Swirl Burners, *J. Energy*, 2, pp. 111-127, 1965.
- Syred, N., and Beer, J. M. (1974). Combustion in swirling flows: a review. *Combustion and Flame*, 23(2), 143-201.
- Syred, N., Chigier, N. A. and Beer, J. M., Flame Stabilisation in Recirculation Zone of Jets with Swirl, *13th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 617-624, 1971.
- Syred, N., Valera-Medina, A., & Bowen, P. (2013). Improving Swirl Flow Generation. In *51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*.
- Taylor, K. C. (1993). Nitric oxide catalysis in automotive exhaust systems. *Catalysis Reviews—Science and Engineering*, 35(4), 457-481.
- Thundil Karuppa Raj, R., & Ganesan, V. (2008). Study on the effect of various parameters on flow development behind vane swirlers. *International Journal of Thermal Sciences*, 47(9), 1204-1225.

- Valera-Medina, A., Syred, N., & Bowen, P. (2012). Central recirculation zone visualization in confined swirl combustors for terrestrial energy. *Journal of Propulsion and Power*, 29(1), 195-204.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. Pearson Education.
- Weber, R., Lverlaan, A., Orsino, S., & Lallemant, N. (1999). On emerging furnace design methodology that provides substantial energy savings and drastic reductions in CO₂, CO and NO_x emissions. *Journal of the Institute of Energy*, 72(492), 77-83.
- Weigand, P., Meier, W., Duan, X. R., Stricker, W., & Aigner, M. (2006). Investigations of swirl flames in a gas turbine model combustor: I. Flow field, structures, temperature, and species distributions. *Combustion and Flame*, 144(1), 205-224.
- Williams, A. (1990). Combustion of liquid fuel sprays. Butterworth-Heinemann.
- Yakhot, V. and L.M. Smith, (1992). The renormalization group, the -expansion and derivation of turbulence models. *Journal of Scientific Computing*, 7(1): p. 35-61.
- Yakhot, V. and S.A. Orszag, (1986). Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. *Journal of Scientific Computing*, 1(1): p. 3-51.
- Yilmaz, B., Ozdogan, S., & Gökalp, I. (2008). Numerical Study on Flame-Front Characteristics of Conical Turbulent Lean Premixed Methane/Air Flames. *Energy & Fuels*, 23(4), 1843-1848.
- Zeldovich, Y. B. (1946). The oxidation of nitrogen in combustion and explosions. *Acta Physicochim. URSS*, 21(4), 577-628.